

# 弹性流体潤滑条件下における新還元添加剤(SOD-1PN)の 添加率が与えるトライボロジーの性能の検証

○学 西 陽希\* 里永憲昭\* 竹田雄祐\* 渡邊孝司\*\* 園田智之\*\*

\*崇城大学, \*\*(有) D1 ケミカル

Verification of Tribological Performance under Elasto hydrodynamic Lubrication Conditions  
with Different Additive Ratios

Haruki NISHI\*, Noriaki SATONAGA\*, Yusuke TAKEDA\*,  
Takashi WATANABE\*\*, Tomoyuki SONODA\*\*

\*Department of Mechanical Engineering, SOJO University Faculty of Engineering, Japan

\*\*D1 Chemical Co., Ltd., Japan

著者らは、これまで潤滑油を構成する成分の違いが、機械の寿命や潤滑性能に与える影響について、光干渉法や電気的接触抵抗法(Electrical Contact Resistance, 以下 ECR と略す)を用いて軸受接触面の弹性流体潤滑条件下 (Elasto Hydrodynamic Lubrication, 以下 EHL と略す) における観測を行い、光学的と電気的の 2 つの観点から潤滑油の油膜厚さの比較評価を行ってきた。これまでの実験は 10vol%一定の条件下で設定してきた。本報において添加率を変更することによる油膜形成や寿命状態に与える影響を検証したので報告する。

キーワード: エンジン油, EHL, ECR, トライボロジー,

## 1. 緒論

潤滑油に添加する添加剤は、基油に対して潤滑性能の改善や酸化腐食の防止、洗浄などを目的として使用される。SOD-1PN は、潤滑摺動部の潤滑面を再生、還元することにより潤滑・摩耗・摩擦といったトライボロジー性能の改善を行うことで従来の金属表面の姿に戻すことをコンセプトとして(有)D1 ケミカルが開発した新還元添加剤である。さらに低粘度化、耐摩耗性、潤滑性を向上し、せん断の影響を受けにくい高粘度ポリ  $\alpha$  オレフィン (PAO) 成分を付加して油膜保持性能の向上、極圧剤として硫黄、亜鉛の成分を加えることにより潤滑膜再生の効果を高めることを実現させている。これまでには添加割合を 10vol% としていたが、それ以下の添加割合 (3, 5, 7vol%) とした場合に性能にどのような影響を及ぼすのかについて軸受油膜可視化装置、スラスト玉軸受寿命試験機を用いた検証結果を報告する。エンジン油 5W-30, 0W-20 に SOD-1PN を添加した割合ごとの動粘度の変化を表 1 に示す。

表 1. SOD-1PN の各添加割合の動粘度の変化

| 添加割合        | 動粘度 [mm <sup>2</sup> / s] |       |       |       |
|-------------|---------------------------|-------|-------|-------|
|             | 5W-30                     |       | 0W-20 |       |
|             | 40°C                      | 100°C | 40°C  | 100°C |
| 無添加 (0vol%) | 56.16                     | 9.19  | 34.65 | 7.42  |
| 3vol%       | 56.19                     | 9.33  | 35.51 | 7.50  |
| 5vol%       | 56.51                     | 9.36  | 36.69 | 7.84  |
| 7vol%       | 57.06                     | 9.65  | 37.76 | 8.04  |
| 10vol%      | 57.48                     | 9.70  | 38.87 | 8.34  |

## 2. 軸受接触面における流動状態の観測

### 2.1 軸受油膜可視化装置の概要

図 1 に示す軸受油膜可視化装置(以下可視化装置と略す)は、軸受の構造を再現しており、上輪部にフラットガラスを用いることで光学的に、また、鋼板に置き換えることで電気的に観測を行うことが可能である。この 2 つの観点から油膜の形成状態を観測し、性能向上の傾向の比較評価を行うことにより、データの信頼性を向上させている。

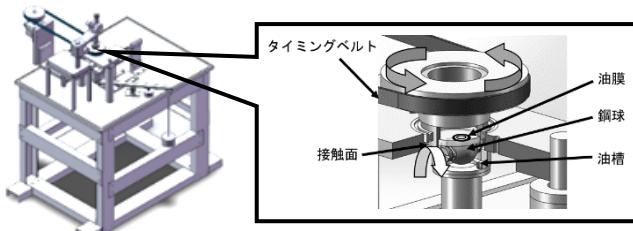


図 1. 軸受油膜可視化装置（右）と詳細図（右）

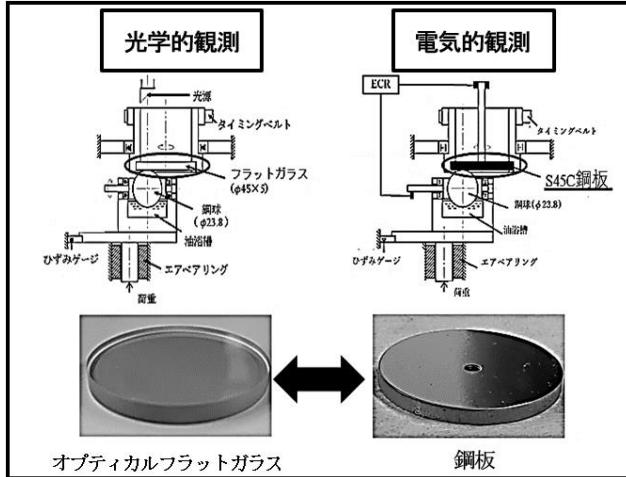


図 2. 光学的観測と電気的観測の切り替え

## 2.2 実験条件

本研究では、エンジン油 5W-30, 0W-20 を使用している。各観測の実験条件を以下に示す。

表 1. 各観測の実験条件

|      | 光学的観測          | 電気的観測    |
|------|----------------|----------|
| 温度   | 40°C           | 40°C     |
| 試験荷重 | 19.4N          | 4.11N    |
| 周速   | 0.188~1.173m/s | 0.565m/s |
| 接触荷重 | 280MPa         | 280MPa   |

## 2.3 光学的観測の概要

光学的観測では、装置の上部から光干渉法を用いて直接油膜の形成状態を観測する。静止時と転動時の油膜の様子を図 3 に示す。

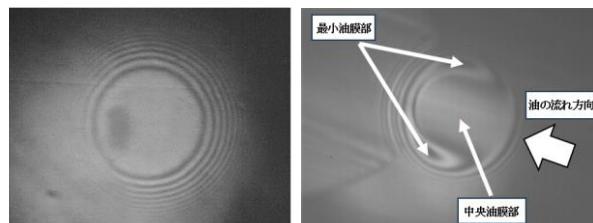


図 3. 油膜の静止時（左）と転動時（右）

潤滑油膜には接触域のほぼ全域で一様の厚さとなる中央膜厚部と接触部の出口側の圧力急降下に対応するように膜厚にくびれが生じて生じる最小膜厚部がある。

この時の光の干渉によって生じる縞の数を縞次数と呼び、これを数え、有次元での油膜の厚さを式 (1) より算出する。

$$h = \frac{m\lambda}{2n} \cdots \cdots (1)$$

m : 縞次数

$\lambda$  : ストロボの波長

n : 潤滑油の屈折率

観測から得た結果から無次元速度パラメータに対する無次元油膜厚さをグラフ化し、潤滑油ごとの油膜厚さを比較評価する。

## 2.4 電気的観測の概要

可視化装置を用いての電気的観測は、直流電源を用いた電気的接触抵抗法による油膜形成状態を観測する。研究に用いた ECR 観測回路を図 4 に示す。

鋼板と鋼球の接点間に形成される油膜を電気抵抗として考え、接点間に油膜が潤滑に形成される場合は電気抵抗が無限となり、油膜が薄い場合は鋼球と鋼板が直接接觸することから電気抵抗は 0 となる。

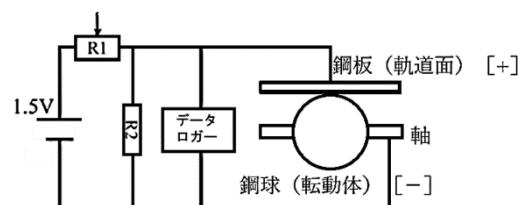


図 4. 電気的観測回路図

この時の印加電圧と観測電圧の比を分離度とし、電気抵抗が大きくなるほど分離度が高く、油膜が厚い状態であると考えることができる。

$$\text{平均分離度} [\%] = \frac{\text{観測電圧}[V]}{\text{印加電圧}[V]} \times 100 \cdots \cdots (4)$$

本研究における印加電圧は 50mV としている。

## 2.4 ヒストグラムの尖度について

電気的観測では,分離度グラフの観測開始時間から10s~60sのデータから作成したヒストグラムを用いて観測データの中央値と尖度を評価する。データのサンプル数は5003点で一定である。

尖度とは,データの分布の尖り具合を表す指標である。尖度0を正規分布とし,尖度が大きいと鋭いピークと広い幅を持った分布となり,尖度が小さいと丸みがかったピークと短く細い尾を持った分布となる。

ヒストグラムの傾向を用いて,油膜の形成状態を見る新たな評価方法について検証している。

分離度が高く,尖度も高いほど油膜の形成が安定した潤滑油であり,劣化していくと分離度が低下していくとともにヒストグラムの形が潰れていき,最終的には分離度が0%に近づき,尖度が0%周辺で高くなっていく傾向を確認できている。

添加割合を高めることで段階的に油膜の厚さが上昇していることが確認できる。

この結果から5W-30において,添加剤を10vol%添加することで潤滑油の油膜厚さが最も厚く形成されることが確認できた。

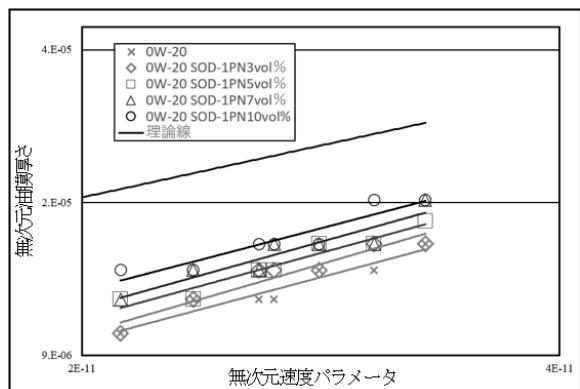


図6. 光学的観測無次元グラフ (0W-20)

## 3. 観測結果

### 3.1 光学的観測結果

以下に各試料油の光学的観測の結果を示す。

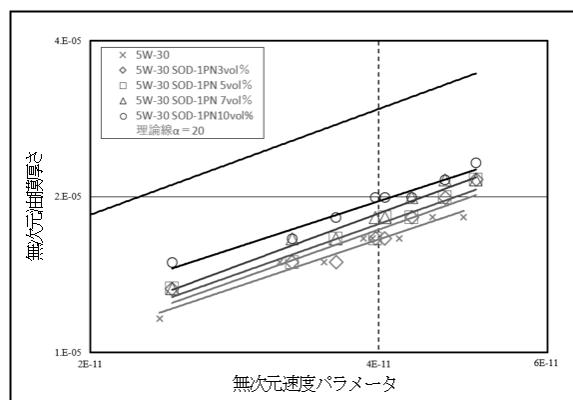


図5. 光学的観測無次元グラフ (5W-30)

表2. 無次元グラフの上昇倍率 (5W-30)

| 添加割合   | 0vol% | 3vol% | 5vol% | 7vol% | 10vol% |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 上昇率[%] | -     | 5.24  | 7.87  | 13.97 | 18.10  |

図5が光学的観測の無次元グラフである。縦軸が無次元での油膜厚さ,横軸が無次元速度パラメータとしている。

表2は無次元速度パラメータが,5W-30では $5.00 \times 10^{-11}$ ,0W-20では $3.00 \times 10^{-11}$ の時の潤滑油単体に対する添加剤の添加割合ごとの油膜厚さ上昇倍率である。

表3. 無次元グラフの上昇倍率 (0W-20)

| 添加割合   | 0vol% | 3vol% | 5vol% | 7vol% | 10vol% |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 上昇率[%] | -     | 6.71  | 11.83 | 17.85 | 24.73  |

0W-20も5W-30と同様に,添加剤の添加割合を大きくしていくほど無次元油膜厚さが厚くなっている,10vol%で油膜厚さが最も上昇することが確認できた。

### 3.2 電気的観測結果

表4に5W-30,表5に0W-20の電気的観測結果を示す。図7~図16の左側は各試料油の分離度グラフ,右側に各データの10~60sのデータのヒストグラムを示している。

表4. 電気的観測結果 (5W-30)

| 添加割合     | 0vol% | 3vol% | 5vol% | 7vol% | 10vol% |
|----------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 平均分離度[%] | 38.36 | 41.67 | 42.87 | 45.73 | 47.60  |
| 上昇率[%]   | -     | 8.63  | 11.76 | 19.21 | 24.09  |
| 尖度       | 1.49  | 7.31  | 4.35  | 5.17  | 4.74   |

表5. 電気的観測結果 (0W-20)

| 添加割合     | 0vol% | 3vol% | 5vol% | 7vol% | 10vol% |
|----------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 平均分離度[%] | 29.13 | 31.54 | 31.69 | 32.02 | 34.79  |
| 上昇率[%]   | -     | 8.27  | 8.79  | 9.92  | 19.43  |
| 尖度       | 8.52  | 8.63  | 8.96  | 14.00 | 9.50   |

## 5W-30

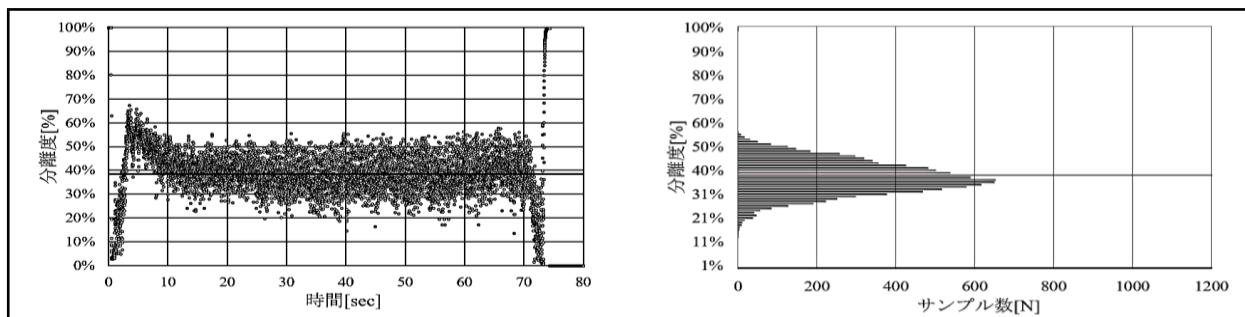


図.7 5W-30 0vol%

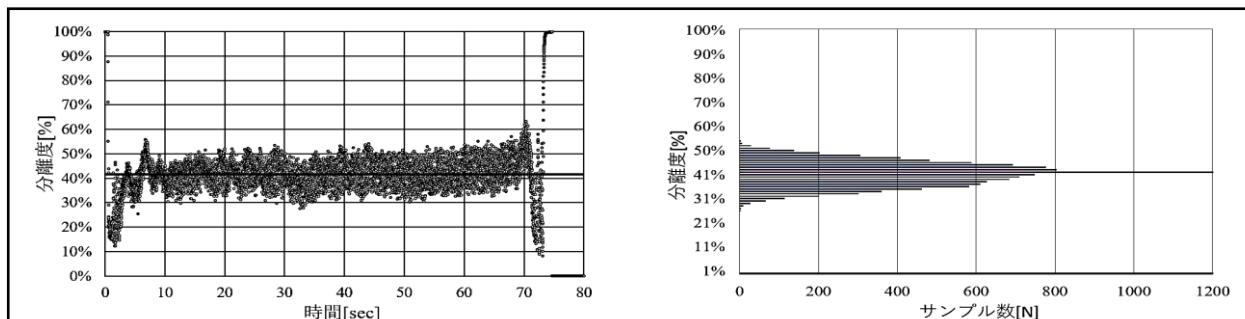


図.8 5W-30+SOD-1PN 3vol%

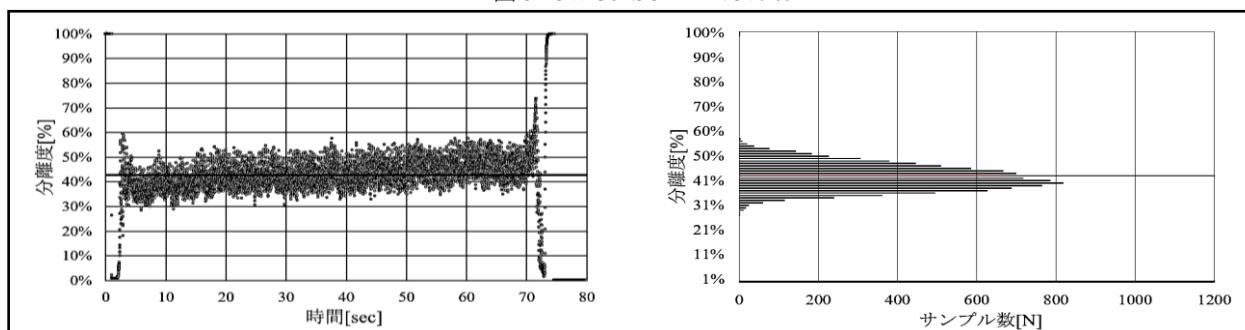


図.9 5W-30+SOD-1PN 5vol%

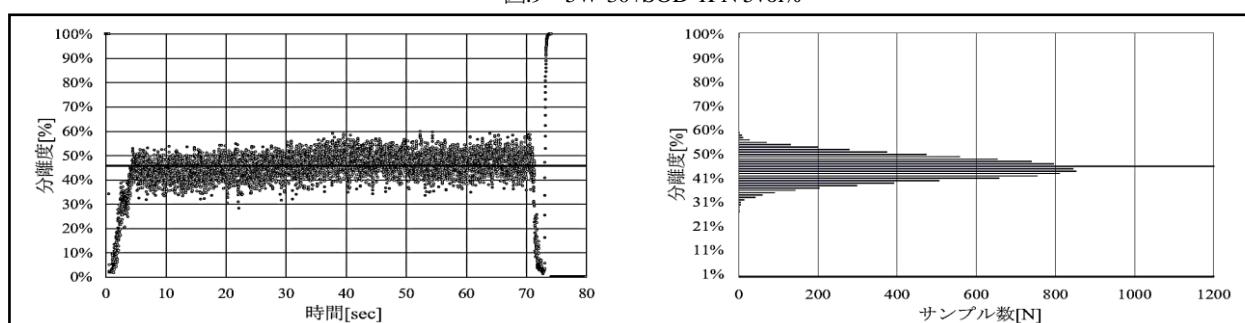


図.10 5W-30+SOD-1PN 7vol%

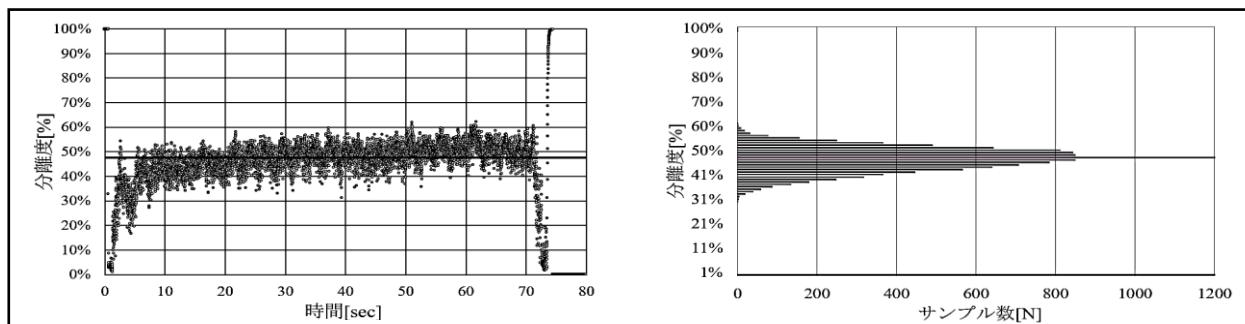


図.11 5W-30+SOD-1PN 10vol%

## 0W-20

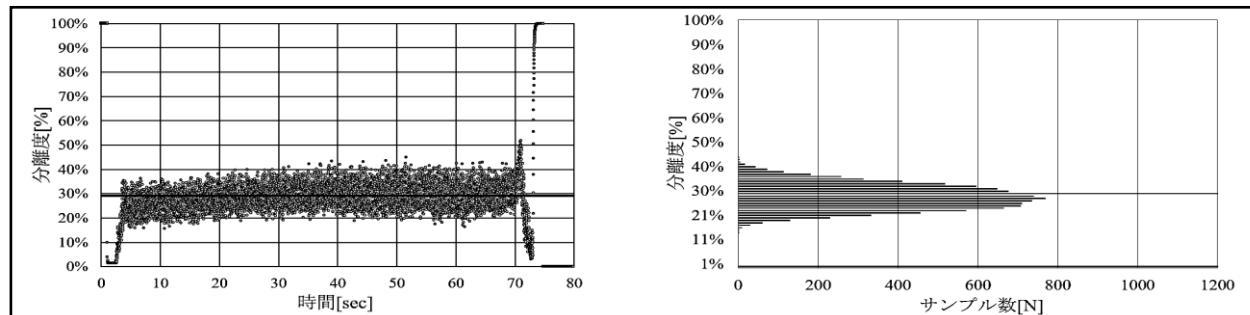


図.12 0W-20 0vol%

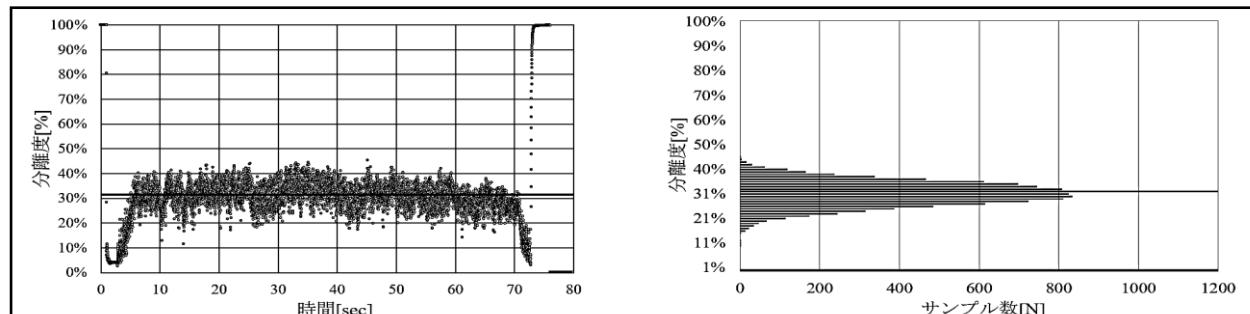


図.13 0W-20+SOD-1PN 3vol%

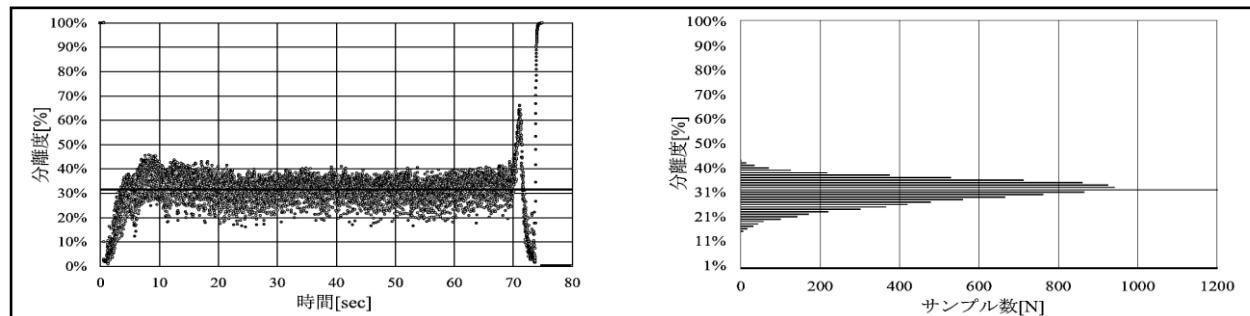


図.14 0W-20+SOD-1PN 5vol%

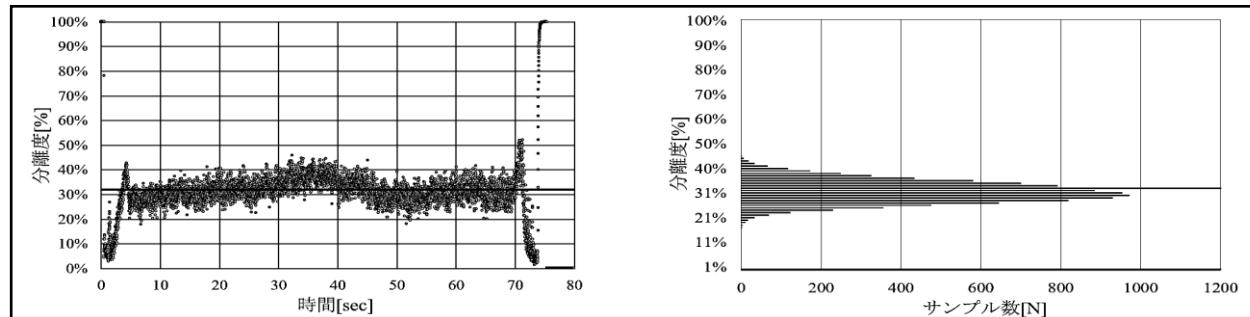


図.15 0W-20+SOD-1PN 7vol%

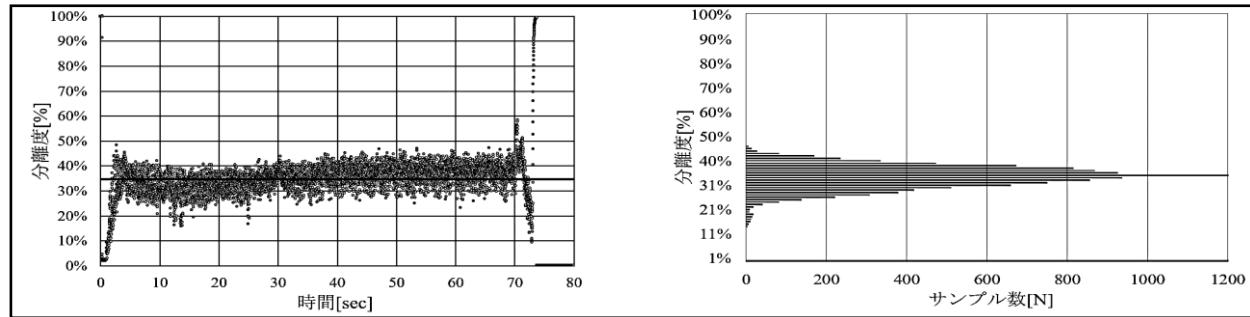


図.16 0W-20+SOD-1PN 10vol%

以上の結果から、電気的観測においても添加剤の添加割合を高くするほど平均分離度が上昇していることが認められ、潤滑油単体の状態よりも添加剤有りの方がヒストグラムの尖度が大きくなっていることが確認できた。

また、光学的観測の結果は電気的観測の結果と同様の傾向となっていることから、この二つの観測には一定の関連性があることが認められた。

### 3.3 寿命試験結果との相関

可視化装置による光学的、電気的観測から、新還元添加剤 SOD-1PN の添加割合に応じて軸受接触面に形成される油膜の厚さが上昇することが確認できた。

本研究室では、潤滑油の性能を機械の寿命延長の観点から評価するために、図 17 に示すスラスト玉軸受寿命試験機（以下寿命試験機と略す）を用いて寿命試験を行っている。

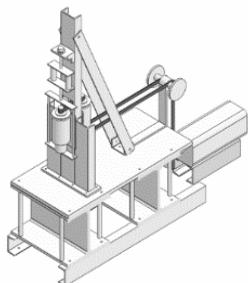


図 17. スラスト玉軸受寿命試験機

図 18 に 5W-30 のワイブル線図を示す。

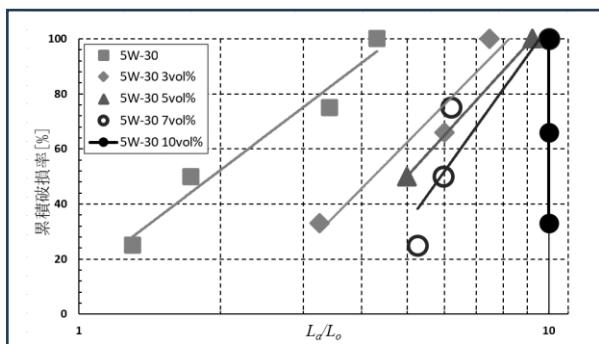


図 18. 5W-30 寿命試験結果

縦軸を、すべての実験を 100%としたときの累積破損率、横軸を  $La/Lo$ （実稼働時間/理論寿命時間）とし、 $La/Lo=10$  の時に十分な稼働を行ったとして完走と判断する。5W-30 を用いたグラフからも添加剤の添加割合が高くなるほどに軸受寿命が延長されていることが確認でき、添加割合が多いほど油膜が厚く形成されるという可視化装置のデータとの関連性が確認できる。

0W-20 の寿命試験が現在測定を行っている段階であるため、測定終了後こちらも油膜厚さとの相関性を確認していく。

### 4.結論

1. 軸受油膜可視化装置の観測結果から、添加率が高くなるほど潤滑油の油膜厚さが厚くなることを確認した。
2. EHL 観測と ECR 観測のグラフの上昇傾向から 2 つの観測に一定の関連性があることが認められた。
3. 寿命試験機の試験結果から、添加率が高くなるほど軸受の寿命が延長されることが確認でき、可視化装置の結果と一定の関連性があることが確認できた。

### 参考文献

- [1] 竹田雄祐, 里永憲昭, 西陽希, 渡辺考司, 園田智之 : 電気的接触抵抗法を用いた潤滑油の状態診断技術の検証, 日本設備管理学会誌, pp41-46(2023)
- [2] T.Mawatari, T.Harada, M.Yano, H.Shiomi, S.Obara, N.Ohno: Rolling Bearing Performance and Film Formation Behavior of Four Multiply-Alkylated Cyclopentane(MAC)Base Greases for Space Applications Tribology Transactions, 56,4 pp561-571.(2013)
- [3] 平野二郎 : ポリオールエステル系合成潤滑油の動向, 潤滑, 第 29 卷, 第 9 号, pp.627-635 (1980)
- [4] 杉村丈一 : 入門講座 トライボロジー公式集 (10) EHL 膜厚計算式, トライボロジスト, Vol49, No.10, pp.799-800(2004)